

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

**Hodnocení tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití plazmové  
technologie**

Hardness Evaluation of Free Edge Surface Using Plasma Cutting Process

Student:

Miroslav Hoško

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Sondel, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

## Zadání bakalářské práce

Student: **Miroslav Hoško**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: Hodnocení tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití plazmové  
technologie  
Hardness Evaluation of Free Edge Surface Using Plasma Cutting  
Process

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii plazmového řezání uhlíkových ocelí
2. Popište normativní požadavky na tvrdost povrchu volných řezných hran
3. Navrhněte metodiku zkoušení tvrdosti povrchu volné řezné hrany
4. Ověřte vlastnosti vybraného zkušebního materiálu

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.  
KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Sondel, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015

  
doc. Ing. Petr Mohyla, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18. 5. 2015

Miroslav Poško  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18. 5. 2015

Miroslav Hoško

.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Miroslav Hoško

Mladějovice 60

785 01 Šternberk

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

HOŠKO, M. *Hodnocení tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití plazmové technologie*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, 2015, 40 s., Vedoucí práce: Ing. Sondel Martin, Ph.D.

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití plazmové technologie. V teoretické části bakalářská práce pojednává o použité technologii a o požadavcích na tvrdost povrchu volných řezných hran. Praktická část se zabývá samotným měřením tvrdosti povrchu a zpracováním informací, ale také měřením geometrie řezných hran. Vzorky o různé jakosti a tloušťky byly řezány plazmovou technologií. Následně byla provedena zkouška tvrdosti povrchu volných řezných hran dle Vickerse. Byla zpracována tabulka s konečnými hodnotami tvrdosti, které přesahují nebo nepřesahují požadovanou hodnotu tvrdosti. Výsledné hodnoty mají praktické využití pro výrobce konstrukčních dílů zhotovených tepelným dělením.

## **ANNOTATION OF BACHELOR**

HOŠKO, M. *Free Hardness Evaluation of Free Edge Surface Using Plasma Cutting Process*. Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Engineering Technology, 2015, 40 p., Thesis head: Ing. Martin Sondel Ph.D.

Bachelor thesis is dealing with free evaluation surface hardness of the cutting edge when using the plasma technology. The theoretical part describes the issue about plasma technology and demands about surface hardness of the cutting edge. The practical part is dealing with measuring of surface hardness of the cutting edge and dealing with surface geometry. Test samples different thickness and quality were cut with plasma technology. Hardness test was realized using Vickers method. Final results were written to chart and were judged, if meet the condition. The resulting values have practical utility for the manufacturer of components made by cutting technology.

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	7
Úvod.....	8
1. Plazmové řezání uhlíkových ocelí .....	9
1.1. Teorie tepelného dělení kovů .....	9
1.2. Fyzikální základy vzniku plazmy.....	9
1.3. Plazmové řezání .....	11
1.3.1. Plyny používané při řezání plazmou.....	12
1.3.2. Zařízení pro řezání plazmou .....	13
1.4. Svařitelnost uhlíkových ocelí .....	15
1.5. Klasifikace tepelných řezů – termíny a definice .....	16
1.5.1. Skluz, $n$ .....	18
1.5.2. Šířka řezné spáry.....	19
1.5.3. Rychlost řezání .....	19
1.5.4. Natavení horní hrany, $r$ .....	19
1.5.5. Drážkování.....	19
1.5.6. Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka, $u$ .....	20
1.5.7. Průměrná výška prvků profilu, $Rz5$ .....	22
2. Normativní požadavky na tvrdost povrchu volných řezných hran .....	24
3. Hodnocení tvrdosti povrchu volné řezné hrany .....	25
3.1. Seznámení praktické části .....	25
3.2. Zkušební vzorky.....	26
3.3. Měření tvrdosti volné řezné hrany .....	28
3.4. Měření kolmosti řezné hrany .....	31
4. Závěr .....	34
Poděkování.....	36
Seznam použité literatury .....	37
Seznam použitých obrázků a tabulek.....	39

## Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotky
Ac3	Začátek překrystalizace austenitu na ferit	-
a	Tloušťka řezu	[mm]
$\Delta a$	Zmenšení tloušťky řezu	[mm]
$C_{ev}$	Uhlíkový ekvivalent	[%]
c	Hloubka drážky	[mm]
CEN	Evropský výbor pro normalizaci	
ČSN	Česká technická norma	-
ČSN EN	Česká verze evropské normy	-
HD plazma	HyDefinition plazma	-
HV10	Tvrдость podle Vickerse při zatížení 10 kg	-
HV10 <sub>max</sub>	Maximální hodnota tvrdosti podle Vickerse při zatížení 10 kg	-
ISO	International Organization for Standardization	-
n	Skluz	[mm]
r	Natavení horní hrany	[mm]
R <sub>eh</sub>	Mez kluzu	[MPa]
Rz5	Průměrná výška prvků profil	[mm]
t	Tloušťka řezaného materiálu	[mm]
TNI	Technická organizační informace	-
u	Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu	[mm]
$\beta$	Úhel šikmého řezu	[ ° ]

## Úvod

V rámci mého předmětu svařování na vysoké škole jsem dostal příležitost pojednat o tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití plazmové technologie. Předmět svařování mě vždy zajímal více než ostatní studijní předměty, proto jsem tuto příležitost využil. Rád bych v tomto směr pokračoval i dále na navazujícím studiu vysoké školy.

V praxi musí ocelové konstrukce a jejich díly splňovat požadavky na jejich užití dle ČSN EN 1090-1+A1 a ČSN EN 1090-2+A1. Musí splňovat své mechanické vlastnosti a jednou z těchto vlastností je tvrdost povrchu volné hrany. Požadavky na tvrdost povrchu volné hrany stanovuje norma ČSN EN 1090-2+A1. Při tepelném dělení se mechanické vlastnosti mění vlivem vysokých teplot a je nutné je podrobit dalším zkouškám a měřením. Tepelné dělení je v tomto případě řezání plazmou, kdy je řezání doprovázeno vysokými teplotami a dochází k změnám hodnot tvrdosti volných řezných hran. Cílem je zhodnotit informace o změně povrchu volné řezné hrany po tepelném dělení. Informace mají význam pro veškeré evropské výrobce konstrukčních dílu zhotovených tepelným dělením.



## **1. Plazmové řezání uhlíkových ocelí**

### **1.1. Teorie tepelného dělení kovů**

Dříve nepříliš rozšířená a méně používaná metoda zpracování materiálu, dnes je tepelné dělení kovů považováno za běžnou úpravu materiálu. Do tepelného dělení kovů spadá především řezání kyslíkem, řezání laserem a plazmové řezání, jako je zobrazeno na obr. č. 1. Největší uplatnění v praxi dříve zastávala technologie řezání kyslíkem, avšak v dnešní době považujeme plazmové řezání i řezání laserem za vyspělé technologie s širokým rozsahem využití. [1]

K dělení materiálu dochází vlivem vysokých teplot. Teplo, které se při řezání uvolňuje, napomáhá procesu řezání. Zdrojem tepla je dle použité technologie buď plamen, plazmový oblouk nebo laser. [1]



**Obr. č. 1 – Plazmové řezání [2]**

### **1.2. Fyzikální základy vzniku plazmy**

První pojem „plazma“ vznikl v 19. století, kdy J. E. Purkyně tak označil čirou tekutinu, kterou lze získat z krve. Později, v letech 1923, americký chemik a fyzik I. Langmuir navrhl použít tentýž výraz pro dnes již známý plyn ve strojírenství, pro plazmu. Nejprve je třeba

si říci, co to plazma je. Plazma je ionizovaný plyn. Ionizovaný plyn vzniká ionizací, což je děj, při kterém probíhá štěpení molekul plynu na kladné ionty nebo na elektrony, a takový plyn je schopen vést elektrický proud. Plazma je tedy elektricky vodivý plyn, ale navenek je elektricky neutrální. Plazma především slouží jako zdroj tepla při svařování a řezání plazmovými technologiemi. Plazmové skupenství je charakterizováno svými specifickými vlastnostmi, je považováno za tzv. „čtvrté skupenství hmoty“. [3]

Při vzájemném kontaktu (srážkách) částic v plynu probíhá nepřetržitá výměna energie. Rychlost částic může být tak velká, že energie vzniklá po srážce dvou molekul vystačí na jejich štěpení na atomy. Jako další zdroj energie jsou elektrony, které se pohybují po svých určitých drahách. Mohou být posunuty na dráhu s vyšší hladinou energie nebo se mohou dokonce z elektronového obalu uvolnit. Po uvolnění elektronu z obalu pak vznikají kladné ionty a záporné elektrony. Z toho vyplývá, že plazma se skládá z molekul, atomů, iontů a elektronů. Plazma obsahuje stejné množství iontů i elektronů, a proto je elektricky vodivá a na druhé straně je její vnější působení je neutrální. [3, 4]

Je možno tedy říci, že plazma je rozštěpený plyn, který je schopen vést elektrický proud, ale zevnějšku je neutrální. Přírodní plazmu je možno najít i kolem nás. Jako například v nitru slunci, ve hvězdách nebo třeba také blesk je příkladem přírodní plazmy. Dalším příkladem může být jiskra přeskakující mezi dvěma vodiči. Plazmový stav lze vyvolat i uměle, a to dostatečným zahřátím plynu nebo přípravou dostatečně silného pole pro emisi (proces vysílání částic látkou). Jako dostatečný zdroj tepla, který nám dovolí plyn zahřát na potřebnou vysokou teplotu, je elektrický oblouk. Plazma neodpovídá vlastnostem ostatních plynů, působí na ni silně elektrické i magnetické pole. Z neutrálního plynu se stává postupně plazma, až se zvyšující se teplotou. Další vlastností plazmy je stupeň ionizace, což znamená procento volných elektronů, a tento stupeň ionizace je závislý na teplotě. Podle stupně ionizace může být plazma buď plně anebo částečně ionizovaná. Jak již bylo zmíněno, plazma je disociovaný (štěpený) plyn, tudíž její další vlastností je stupeň disociace a stupeň disociace je závislý na druhu plynu a na teplotě, při kterém k ionizaci dochází. [3, 4]

Plazmový paprsek je popisován vlastnostmi, které spolu navzájem souvisí, a to svou elektrickou vodivostí, svou vysokou hustotou výkonu a svým symetrickým rotačním tvarem.

Rotační tvar, který vychází z katody, je dán umělým zúžení plazmového proudu. Zúžení má za následek nárůst sil, které stahují sloup paprsku, čímž se dosáhne značné hustoty výkonu, a to od  $10^5$  do  $10^6$  W. cm<sup>-2</sup>. Plyn se v zúženém místě ohřeje na teplotu až 50 000 K, avšak tyto vysoké teploty působí pouze ve středu plazmového paprsku. [3, 5, 6]

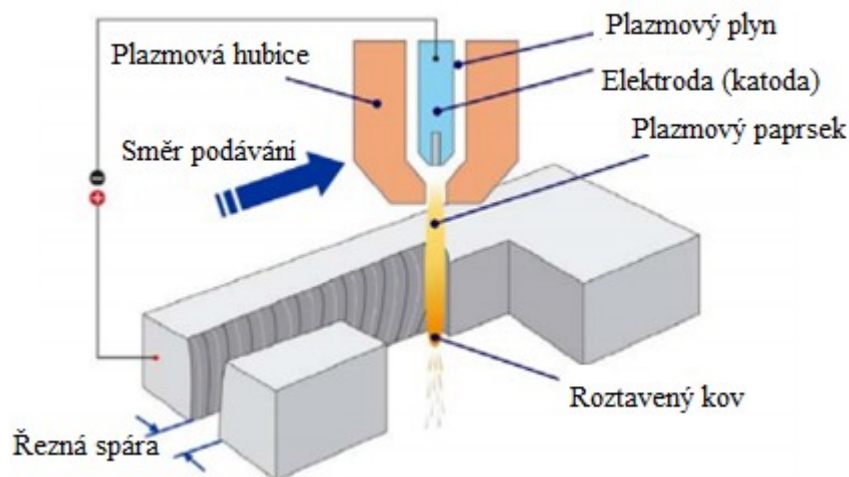
### **1.3. Plazmové řezání**

Plazmové technologie jsou dnes velmi moderní a stále kupředu jdoucí technologie. Díky výzkumu vznikají nové plazmové technologie, které nám nabízí nové využití plazmového plynu a tudíž nové možnosti zpracování materiálů. Velké zastoupení těchto technologií má technologie svařování a řezání plazmou. Dále to jsou méně známé technologie, které mají své zastoupení např. ve spalování odpadu, v povrchových úpravách nebo dokonce i v kosmickém průmyslu, kdy vědci začínají mluvit o prvních plazmových pohonech. [7]

I plazmové řezání dnes přináší moderní a efektivní způsoby dělení materiálu. Je to technologie stále jdoucí dopředu se zahrnujícími výhodami, jako je především zkrácení strojních časů, efektivita, kvalita a schopnost řezat velký počet různých kovů. Při plazmovém řezání vznikají velmi vysoké teploty a energie, podobně jako u svařování plazmou, a dochází k oddělování materiálu. Lze řezat neželezné kovy, slitiny kovů a nekovové materiály, to však neplatí pro autogen, což je jedna z výhod řezání plazmou. Během řezného procesu plazmový paprsek vystupuje z řezací hubice a natavený kov se z řezné spáry odstraňuje v důsledku tlaku a dynamického účinku plazmového plynu, jako je zobrazeno na obr. č. 2. Kvalita řezu při řezání plazmou dosahuje lepších parametrů než při použití autogenu, nevzniká velké množství otřepů, a ty které vzniknou, se lehce odstraní. Také rychlosti řezání jsou vyšší ve srovnání s řezáním kyslíkem, pohybují se v rozmezí 10 – 12 m·min<sup>-1</sup>, avšak se snižující tloušťkou materiálu tato rychlost řezání vzrůstá. Rychlost řezání plazmou může být až dvanáctkrát větší ve srovnání s řezáním kyslíkem. Další výhodou jsou žádné nebo minimální deformace řezaných tenkých plechů z důvodu méně ovlivněné tepelné oblasti při řezání. [8]

Také v rámci bezpečnosti je plazma vhodnější, zdroj tepla lze snadno korigovat, a jak již bylo zmíněno, tepelně ovlivněná oblast materiálu je do rozsahu mnohem menší. U plechu

z uhlíkové oceli, tloušťky 18 mm je tepelně ovlivněná oblast v rozsahu 2 mm u řezání plazmou, kdežto u autogenu je to až 12 mm. Další výhodou je úbytek hmotnosti plazmových strojů, zvýšení výkonnosti a snadná automatizace. Například jednofázové plazmové systémy váží jen asi kolem 9 kg a jsou schopny řezat materiály o tloušťce 12 mm. [8]



**Obr. č. 2** – princip řezného procesu [9]

V současné době se využívá několik variant řezací technologie. Patří tam řezání kyslíkem, plazmou a laserem. Každá z těchto technologií tepelně ovlivňuje materiál v oblasti řezu. Teploty se pohybují nad hodnotami teploty  $A_{c3}$ , kdy po zchlazení nastávají změny v oblasti struktury a změny vlastností. Tyto změny jsou charakterizovány nejen vysokými teplotami, ale i tvrdostí, geometrií a drsností povrchu. Vzniká však nebezpečí vzniku trhlin, to závisí i na použité technologii, na způsobu řezání a na tloušťce řezaného materiálu. V důsledku vzniku trhlin, vysoké tvrdosti a požadovaného designu se oblast tepelně ovlivněných hran dále obrábí. [9]

### **1.3.1. Plyny používané při řezání plazmou**

Plyny používané pro řezání plazmou se liší dle druhu řezaného materiálu a jsou to buď jednoatomové, nebo dvouatomové plyny. Jako jednoatomový plyn se používá především argon, mezi dvouatomové řadíme vodík, kyslík, dusík (viz tab. 1). V praxi se volí obvykle

kombinace uvedené v tabulce 1. Plazmový plyn se během procesu ionizuje a disociuje. V důsledku toho vzniká velké množství energie a tepla, které je převáděno na materiál. [11]

V současné době je moderní použití plazmy s vysokou koncentrací paprsku (HyDefinition plazma, či Fine Focus plazma). Fokuse, neboli zaostření plazmového svazku, je zde až trojnásobná, tudíž dochází ke vzniku většího množství energie, což vede k lepším výsledkům řezání. Mezi tyto výhody patří např. zúžení řezné spáry nebo také zvýšení řezné rychlosti. Pro tenčí plechy do 10 mm, při použití HD plazmy, jsou řezy velmi hladké a bez otřepů. Také je třeba dbát na čistotu plazmového plynu. Čistota plazmového plynu ovlivňuje části a součásti plazmového hořáku, a také kvalitu řezu. [11, 12]

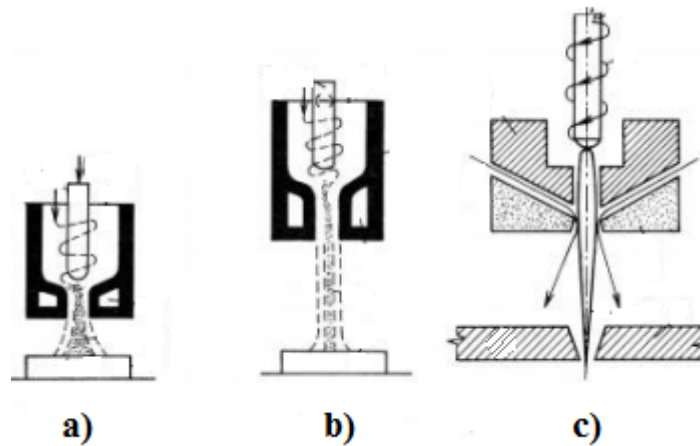
**Tabulka 1** – Používané plyny v závislosti na materiálech [12]

<b>Materiál</b>	<b>Používaný plyn</b>
<i>Konstrukční ocel</i>	kyslík, vzduch
<i>Vysoce legovaná ocel</i>	argon/vodík, argon/vodík/dusík, argon/dusík, argon, vzduch
<i>Lehké kovy</i>	argon/vodík, vzduch
<i>Barevné kovy</i>	argon/vodík
<i>Kompozitní materiály</i>	argon/vodík, argon/vodík/dusík, vzduch, kyslík

### 1.3.2. Zařízení pro řezání plazmou

Každé technologické zařízení využívající plazmového plynu musí obsahovat následující elementy. A je to plazmový hořák, řídicí jednotka, manipulační zařízení a zdroj elektrického proudu. Plazmový hořák má za úkol převádět elektrickou energii na tepelnou energii plazmy. Stabilizace elektrického oblouku je obzvlášť důležitou vlastností plazmového hořáku. Plazmové hořáky se mohou dělit na plazmové hořáky s plynovou nebo vodní stabilizací (viz obr. č. 3). Dále plazmové hořáky s plynovou stabilizací se rozdělují dle provedení na dva typy a to na hořák s transferovým obloukem, kde elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou a mezi obráběným materiálem, a na hořák s netransferovým obloukem. U netransferového oblouku hoří oblouk mezi vnitřní elektrodou a výstupní tryskou (anodou). Tento oblouk se používá pro obrábění nevodivých materiálů. [13, 14]

Hořáky s vodní stabilizací se používají především pro řezání neželezných kovů a k nanášení povlaků. Voda se zde přivádí kanálky do plazmového hořáku. U tohoto typu hořáku dochází k řezání pod vodou, čímž se snižuje hlučnost a vliv UV záření. [14]



**Obr. č. 3** – typy plazmových hořáků: a) s transferovým obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) s vodní stabilizací [14]

Existuje několik typů plazmových hořáků pro vytvoření plazmového paprsku. Tyto plazmové hořáky lze rozdělit dle typu vzniku plazmy [3]:

- **hořáky se závislým (přeneseným) plazmovým paprskem**
  - pro vytvoření plazmového paprsku slouží wolframová elektroda zapojená jako katoda a základní materiál tvořící anodu
  - svařovací hubice je málo tepelně namáhána
  - větší životnost
  - používá se pro svařování, řezání, navařování
- **hořáky s nezávislým (nepřenosným) plazmovým obloukem**
  - oblouk hoří mezi katodou a anodou, tvořenou tryskou, z níž vystupuje plazmový paprsek
  - oblouk je nezávislý na svařovaném materiálu
  - hubice hořáku je velmi tepelně namáhána, proto je potřeba chladit
  - použití pro metalizaci a řezání nevodivých materiálů

- lze použít pouze inertní plyny, nebo inertní plyny s minimem aktivních plynů
- **hořáky s kombinovaným zapojením**
  - kombinace obou výše uvedených hořáků
  - využívá dvou oblouků, jeden je pomocný (hořící mezi wolframovou elektrodou a povrchem trysky tvořící anodu), druhý je nezávislý
  - plazmový plyn se v oblasti nezávislého oblouku zahřeje na vysokou teplotu a prochází tryskou
  - nezávislý oblouk hoří nezávisle i po zapálení závislého oblouku
  - používá se pro tzv. svařování mikrop plazmou (nízké proudy, k navařování, k řezání)

#### **1.4. Svařitelnost uhlíkových ocelí**

Tato práce se nezabývá svařováním, avšak informace v rámci řezání a svařování spolu úzce souvisí, proto je zde zařazena kapitola svařitelnost uhlíkových ocelí. Svařitelnost uhlíkových ocelí je podmíněna chemickými vlastnostmi oceli. Uhlíkové oceli obsahují často pouze jen některé prvky a to C, Mn, Si, P, a S. Jejich svařitelnost závisí na obsahu uhlíku a platí, čím více má ocel obsahu uhlíku, tím více se zvyšuje její mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost a její plastické vlastnosti se snižují. Také platí pravidlo, že čím více ocel obsahuje uhlíku, tím více se zvětšuje náchylnost k zakalení při svařování a zvyšuje se náchylnost ke vzniku studených trhlin. Obsah uhlíku u uhlíkových ocelí je omezován do  $C \leq 0,25 \%$ . Při tomto obsahu uhlíku a při menších tloušťkách materiálu, nemusíme ocel před svařováním předehřívat. Jelikož vznik trhlin způsobuje i difúzní vodík a tuhost konstrukce, je vhodné se o nutnosti výpočtu předehřevu přesvědčit výpočtem některé z rovnic teploty předehřevu. Teplota interpass a dohřev není ve většině případu uhlíkových ocelí nutný (mimo svařování velkých tloušťek). Pokud je třeba svařovat větší tloušťky materiálu a uhlíkové oceli s vyšším obsahem uhlíku, je předehřev nutný (dle tab. 1.1). [5]

**Tabulka 2** – Teploty předehřevu dle obsahu uhlíku [5]

<b>Obsah uhlíku (%)</b>	<b>Teplota předehřevu (°C)</b>
0,20 – 0,30	100 – 150
0,30 – 0,45	150 – 275
0,45 – 0,8	275 – 425

Při svařování s vysokým tepelným příkonem dochází k pomalejšímu ochlazování v okolí svaru, tudíž netřeba provádět předehřev. Ke svařování s vysokým tepelným příkonem se používají elektrody větších průměrů, nebo metody svařování s vyšším tepelným příkonem na jednotku délky svaru. Oceli s vyšším obsahem uhlíku je vhodné po svařování zahřát na cca 200°C po dobu 2 až 6 hodin. Sníží se tak obsah vodíku ve svaru. Pokud svařujeme součásti větší tloušťky, je vhodné součást normalizačně žíhat kvůli snížení zbytkových napětí. Svařitelnost uhlíkových ocelí je podmíněna dalšími legujícími prvky a jejich nečistotami. [5]

### **1.5. Klasifikace tepelných řezů – termíny a definice**

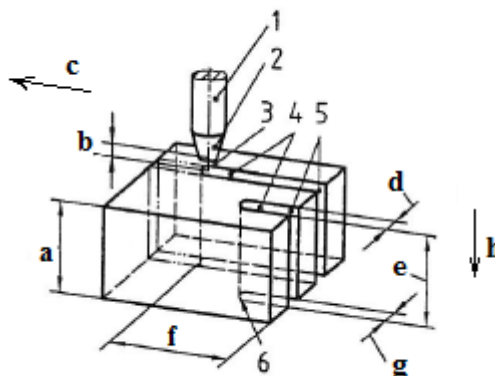
Kvalita povrchu řezné hrany je při řezném procesu ovlivňována mnoha faktory. Na kvalitu povrchu je kladen velký důraz, a je proto často rozhodující, jaká tepelná dělicí technologie bude pro materiál použita. Jakost povrchu řezu je charakterizována především těmito veličinami [15]:

- úchylkou kolmosti nebo úhlovou úchylka
- průměrnou výšku prvků profilu
- skluzem
- natavením horní hrany
- přítomnost okují nebo natavených kapek na dolní hraně řezu

Na obr. č. 4 jsou uvedeny veškeré pojmy vztahující se k procesu řezání obráběného kusu dle ČSN EN ISO 9013. Plazmový paprsek vystupuje z řezacího hořáku. Roztavený kov se odvádí z řezné spáry v důsledku tlaku a dynamického účinku plazmového paprsku. Pojmy vztahující se k obráběnému kusu po ukončení řezání jsou uvedeny na obr. č. 5. V praxi se můžeme setkat s několika základními typy řezů, jež jsou uvedeny na obr. č. 6. Aby byl



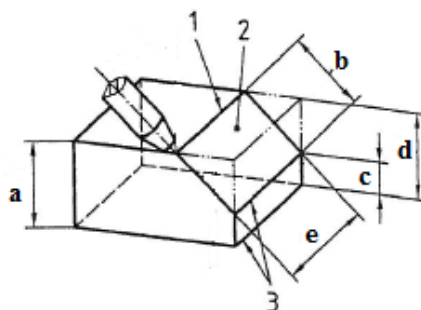
splněn požadovaný tvar součásti, často se v praxi lze setkat i s tvarovými řezy, aby byl splněn požadovaný tvar součásti, které jsou uvedeny na obr. č. 7. [15]



**Obr. č. 4** – Pojmy vztahující se k procesu řezání dle ČSN EN ISO 9013 [15]

**Vysvětlivky:**

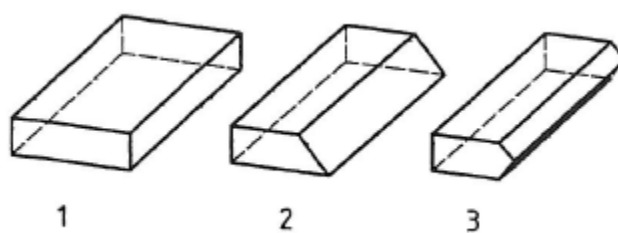
1 – Řezací hořák; 2 – Hubice; 3 – Paprsek; 4 – Řezná spára; 5 – Začátek řezu; 6 – Konec řezu;  
a – Tloušťka řezu; b – Vzdálenost trysky; c – Směr posunu; d – Šířka ř. spáry na horní ploše;  
e – Řezná tloušťka; f – Délka řezu; g – Šířka řezné spáry na dolní ploše; h – směr řezání.



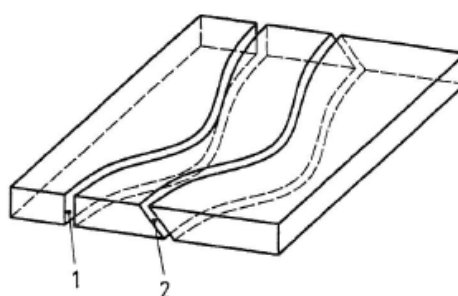
**Obr. č. 5** – Pojmy vztahující se k zpracovávanému kusu po ukončení řezání dle ČSN EN ISO 9013 [15]

**Vysvětlivky:**

1	Horní hrana řezu	a	Tloušťka řezu
2	Povrch řezu	b	Tloušťka řezu (první možnost)
3	Dolní hrana řezu	c	Výška kořenové plochy
		d	Tloušťka řezu (druhá možnost)
		e	Délka řezu



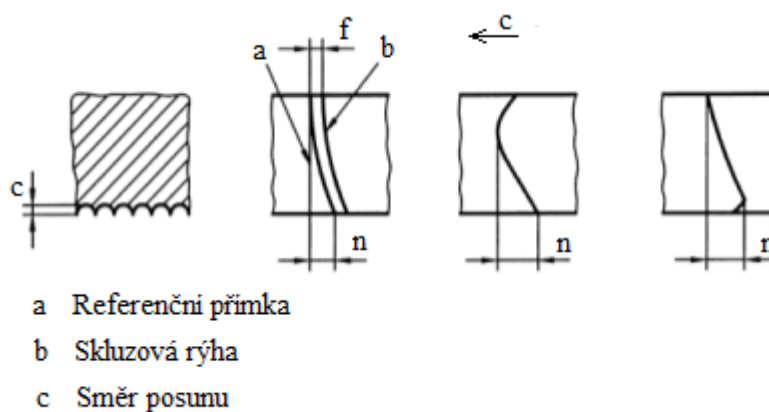
**Obr. č. 6** – Typy řezů; 1 – svislý přímý řez, 2 – šikmý přímý řez, 3 – dvojitý šikmý přímý řez [15]



**Obr. č. 7** – Tvarové řezy; 1 – svislý tvarový řez, 2 – šikmý tvarový řez [15]

### 1.5.1. Skluz, $n$

Skluz  $n$ , zobrazený na obr. č. 8, lze vyjádřit jako průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání. [15]



**Obr. č. 8** – Skluzová rýha [15]

### 1.5.2. Šířka řezné spáry

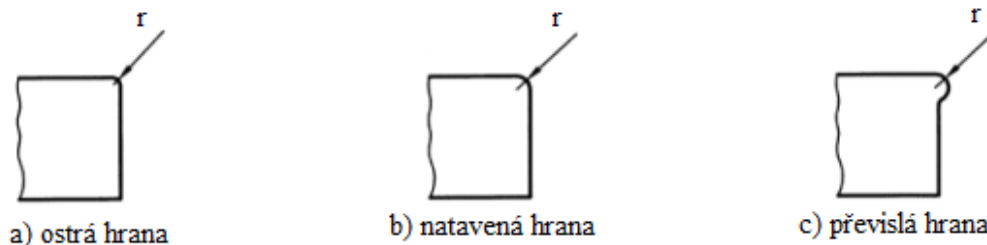
Šířku řezné spáry lze vyjádřit jako vzdálenost mezi povrchy řezu na horní hraně řezu. Pokud došlo během řezání k natavení horní hrany, měří se tato vzdálenost bezprostředně pod natavením horní hrany. [15]

### 1.5.3. Rychlost řezání

Rychlost řezání lze vyjádřit jako relativní rychlost mezi nástrojem a opracovávaným materiálem. [15]

### 1.5.4. Natavení horní hrany, $r$

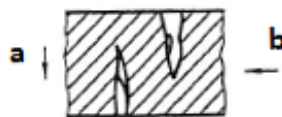
Natavení horní hrany,  $r$  je zobrazeno na obr. č. 9. Je to veličina charakterizující tvar horní hrany řezu. [15]



Obr. č. 9 – Tolerance natavení řezné hrany [15]

### 1.5.5. Drážkování

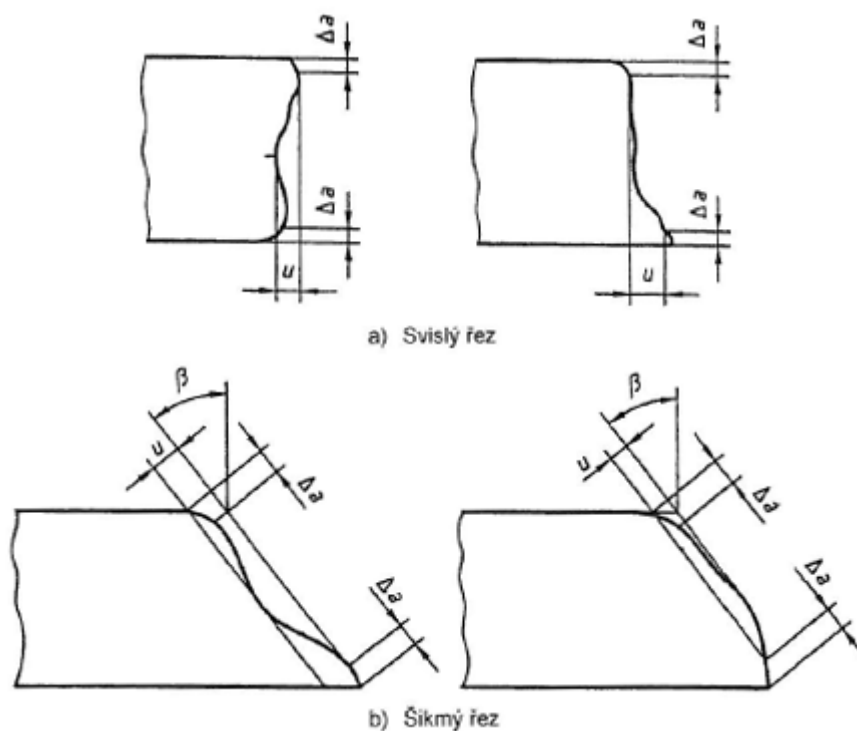
Při řezání mohou také vznikat prohlubeniny a zářezy o různé šířce, hloubce a tvaru a negativně ovlivňují povrch řezné hrany. Tento jev nazýváme drážkování. Příklad drážkování je uveden na obr. č. 10. [15]



**Obr. č. 10** – Drážkování; a – směr řezání, b – směr posuvu [15]

### 1.5.6. Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka, $u$

Úchylky kolmosti nebo úchylky úhlu  $u$ , které jsou uvedeny na obr. č. 11, definujeme dle ČSN EN ISO 9013 jako vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami, které svírají s povrchem řezného materiálu určitý úhel. V praxi je to často  $90^\circ$ , pokud hovoříme o řezech svislých. Toleranční pole pro úchylku kolmosti je uvedeno v tabulce 3 a na obr. č. 12 a 13. [15]



**Obr. č. 11** – Úchylky kolmosti nebo úchylky úhlů [15]

#### Vysvětlivky:

a Tloušťka řezu

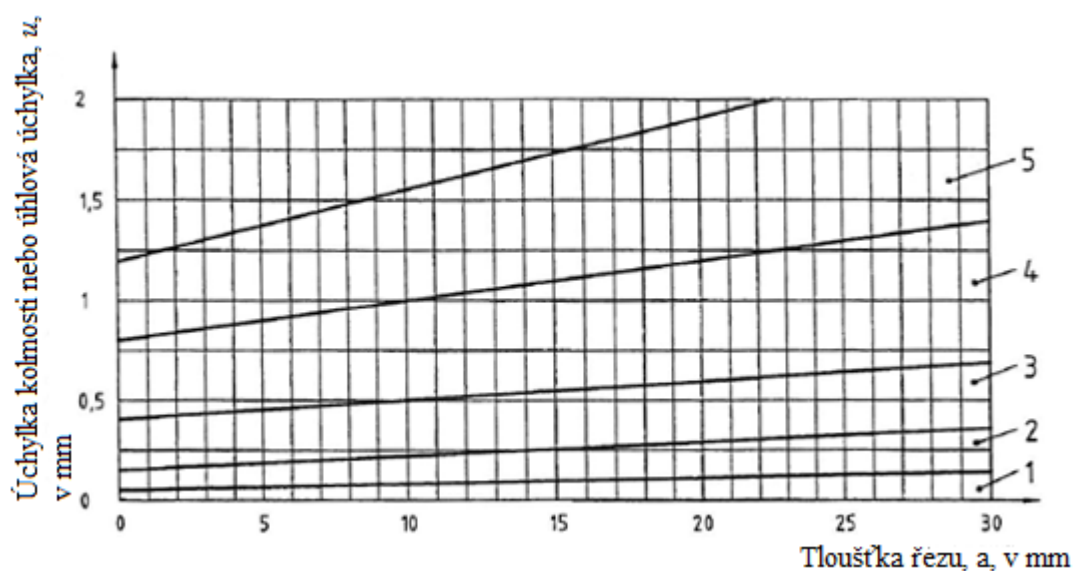
$\Delta a$  Zmenšení tloušťky řezu

$\beta$  Úhel šikmého řezu

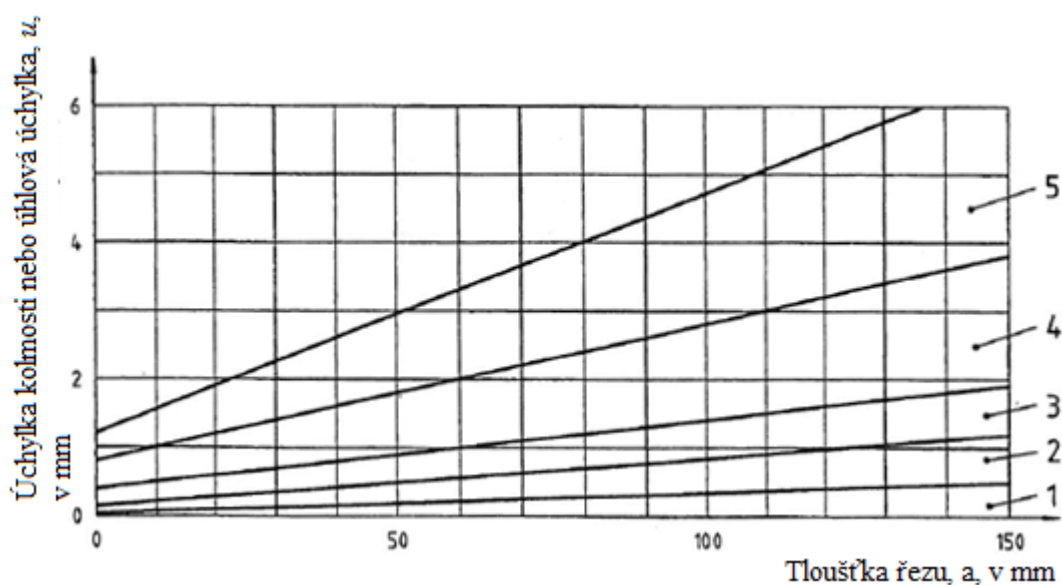
$u$  Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu

**Tabulka 3** – Toleranční pole  
pro úchylku kolmosti dle ČSN EN ISO 9013 [15]

Toleranční pole	Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka, $u$ [mm]
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$



**Obr. č. 12** – Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu,  $u$  – tloušťka zpracovávaného kusu  
do 30 mm [15]



**Obr. č. 13** – Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu,  $u$  – tloušťka zpracovávaného kusu do 150 mm [15],

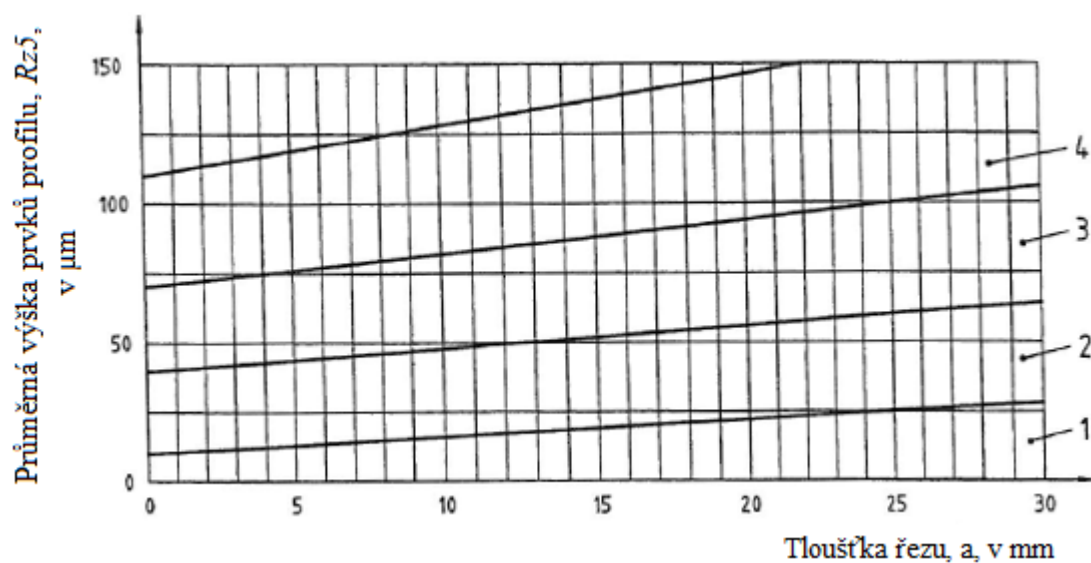
Vysvětlivky: 1 až 5 Toleranční pole (viz tabulka 3)

### 1.5.7. Průměrná výška prvků profilu, $Rz5$

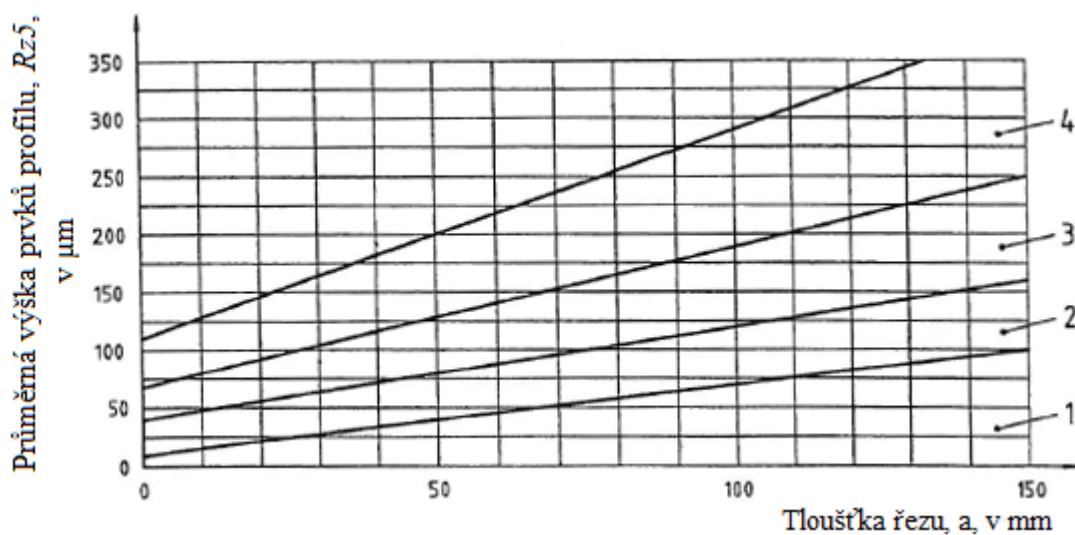
Průměrná výška prvků profilu,  $Rz5$  je součet výšky výstupků povrchu a hloubky profilu povrchu. Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu je uvedeno v tabulce 4 a na obrázku 14 a 15. [15]

**Tabulka 4** – Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu [15]

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu, $Rz5$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$



**Obr. č. 14** – Průměrná výška prvků profilu,  $Rz5$  – tloušťka zpracovávaného kusu do 30 mm  
[15]



**Obr. č. 15** – Průměrná výška prvků profilu,  $Rz5$  – tloušťka zpracovávaného kusu do 150 mm  
[15]

Vysvětlivky: 1 až 4 Toleranční pole (viz tabulka 4)

## 2. Normativní požadavky na tvrdost povrchu volných řezných hran

Cílem této práce je vyhodnotit informace okolo tvrdosti povrchu volných řezných hran, které budou dále využitelné v praktické činnosti. V praxi je třeba stanovit technické požadavky na výrobu ocelových konstrukcí. Technickými požadavky na provádění ocelových konstrukcí nebo jejich dílců se zabývá norma ČSN EN 1090-2+A1 a zajišťuje odpovídající úroveň mechanické únosnosti a stability, použitelnosti a trvanlivosti. Stanovuje také požadavky pro dělení, tváření, provádění děr a sestavení základních výrobků pro zabudování dílců. Tato norma je závazná pro všechny výrobce dodávající konstrukční díly na trh Evropské unie. [16]

Při tepelném dělení plazmovou technologií v okolí místa řezu vzniká pásmo tepelně ovlivněné oblasti (TOO), které dále ovlivňuje další vlastnosti povrchu řezných hran zahrnující tvrdost. V této práci se bude měření tvrdosti volných řezných hran provádět dle Vickerse a to při zatížení HV10. Maximální dovolené hodnoty tvrdosti povrchů volných hran při zatížení HV10 stanovuje norma ČSN EN 1090-2+A1 a hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5. [16]

**Tabulka 5** – Maximální dovolené hodnoty  
tvrdosti dle ČSN EN 1090-2+A1 při zatížení HV10 [16]

Normy výrobků	Pevnostní třída oceli	Hodnoty tvrdosti dle ČSN EN 1090-2+A1
EN 10025-2 až 5	S235 až S460	380
EN 10210-1, EN 10219-1		
EN 10149-2 a EN 10149-3	S260 až S700	450
EN 10025-6	S460 až S690	



### 3. Hodnocení tvrdosti povrchu volné řezné hrany

Úkolem praktické části této práce bylo vyhodnotit a zpracovat informace týkající se tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití plazmové řezací technologie. Jak již bylo popsáno v předešlé kapitole, požadavky na posouzení tvrdosti se zabývá norma ČSN EN 1090-2+A1 a stanovuje maximální hodnoty tvrdosti uvedené v tabulce 5. Kromě primárního měření tvrdosti se tato práce zaměřuje na posouzení geometrie po teplem dělení plazmovou technologií. Praktická část je rozdělena na několik kapitol, které budou po sobě následovat:

- seznámení praktické části,
- zkušební vzorky,
- měření tvrdosti volné řezné hrany,
- měření kolmosti řezné hrany.

#### 3.1. Seznámení praktické části

Realizace se konala ve firmě v Moravskoslezském kraji zabývající se výrobou plechů a výpalků. Odběr zkušebních vzorků se prováděl na řezacím stroji VANAD PROXIMA 35/285 s plazmovým hořákem (viz obr. č. 16). Parametry řezacího stroje jsou uvedeny v tabulce 6.



Obr. č. 16 – Řezací stroj VANAD PROXIMA 35/285 [17]

**Tabulka 6** – parametry řezacího stroje [17]

Rok výstavby	2003
Šířka pracovního stolu	3 500 mm
Délka pracovního stolu	28 000 mm
Maximální řezací tloušťka	20 mm
Řezací rychlost	max. 4000 mm/min
Hořák	Plazma burner HD 4070 1psc
Použitý plyn	dusík

### 3.2. Zkušební vzorky

V rámci vyhodnocení tvrdosti povrchu volné řezné hrany bylo použito 7 vzorků z oceli o různé jakosti a tloušťky. Použité vzorky jsou uvedeny v tabulce 7. V tabulce jsou uvedeny tloušťky vzorků a jejich zařazení do skupin dle TNI CEN ISO/TR 15608. Chemické složení vzorků je uvedeno v tabulce 8. Vzorky jsou označeny písmeny A až G. Vzorky byly řezány plazmovou technologií na rozměry 50x200 mm. Jak již bylo zmíněno, hrany byly řezány plazmovou technologií na řezacím stroji VANAD APROXIMA 35/285. Vysvětlení a popis použitých ocelí je dále popsáno v tabulce 9 dle technického předpisu TNI CEN ISO/TR 15608.

**Tabulka 7** – zařazení materiálů do skupin a jejich tloušťky

zkušební vzorek	skupina	ocel dle ČSN EN 10027-1	tloušťka (mm)
A	1.1	S235JR+N	5
B	1.2	S355J2+N	5
C	1.4	S355J2W+N	10
D	1.3	S460N	10
E	1.1	S235JR+N	20
F	1.2	S355J2+N	20
G	1.3	S460N	18

**Tabulka 8 – Chemické složení vzorků**

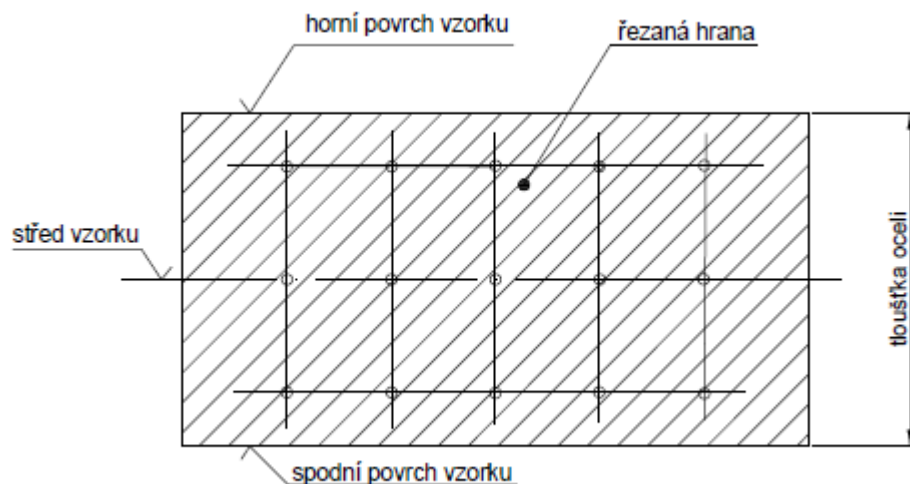
označení vzorku	Chemické složení (%)						
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
A	0,122	0,370	0,250	0,015	0,007	0,070	0,030
B	0,170	1,370	0,350	0,017	0,003	0,020	0,020
C	0,154	1,440	0,460	0,014	0,004	0,310	0,030
D	0,190	1,620	0,210	0,016	0,003	0,050	0,040
E	0,101	0,690	0,280	0,015	0,008	0,030	0,020
F	0,175	1,430	0,380	0,018	0,008	0,030	0,030
G	0,192	1,650	0,200	0,020	0,003	0,040	0,070
označení vzorku	Chemické složení a uhlíkový ekvivalent (%)						
	Cr	Mo	V	Ti	Al	N	Cev
A	0,050	0,004	0,003	0,002	0,024	0,006	0,200
B	0,050	0,001	0,004	0,004	0,045	0,005	0,410
C	0,470	0,003	0,004	0,004	0,028	0,005	0,510
D	0,090	0,006	0,074	0,002	0,026	0,008	0,510
E	0,080	0,005	0,004	0,002	0,034	0,005	0,240
F	0,090	0,006	0,005	0,002	0,026	0,006	0,440
G	0,110	0,008	0,072	0,002	0,028	0,009	0,510

**Tabulka 9 – Zařazení vybraných skupin oceli dle TNI CEN ISO/TR 15608 [18]**

Skupina	Podskupina	Druh oceli
1		Oceli se stanovenou minimální mezí kluzu $R_{eH} \leq 460$ N/mm <sup>2</sup> a obsahem prvků v %: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <math>C \leq 0,25</math>  <math>Si \leq 0,60</math>  <math>Mn \leq 1,8</math>  <math>Mo \leq 0,70</math>  <math>S \leq 0,045</math>  <math>P \leq 0,045</math>  <math>Ti \leq 0,05</math> </div> <div> <math>P \leq 0,045</math>  <math>Cu \leq 0,40</math>  <math>Ni \leq 0,5</math>  <math>Cr \leq 0,3</math>  <math>Nb \leq 0,06</math>  <math>V \leq 0,1</math> </div> </div>
	1.1	Oceli se stanovenou mezí kluzu $R_{eH} \leq 275$ N/mm
	1.2	Oceli se stanovenou mezí kluzu $275 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 360$ N/mm
	1.3	Normalizované jemnozrnné oceli se stanovenou mezí kluzu $R_{eH} > 360$ N/mm <sup>2</sup>
	1.4	Oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi, u kterých obsah prvků může překročit požadavky pro jednotlivé prvky, jak jsou uvedeny pro skupinu 1

### 3.3. Měření tvrdosti volné řezné hrany

Cílem tohoto měření bylo posouzení a vyhodnocení informací ohledně tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití plazmové technologie. Tyto informace pomohou charakterizovat vlastnosti a kvalitu řezného povrchu s cílem využití těchto informací v praxi. Tvrdost byla měřena dle Vickerse při zatížení HV10. Nominální hodnota tohoto zatížení se rovná síle 98,07 N. Tvrdost byla měřena v pěti bodech na třech místech: na horním povrchu, středu a na spodním povrchu. U zkušebních vzorků A a B byla tvrdost měřena jen na středu povrchu řezné hrany z důvodu menší tloušťky oceli. Schéma měření tvrdosti je uvedeno na obrázku 18. Tvrdost se měřila kolmo na řezný povrch, po mechanickém broušení ve vzdálenosti 1 mm od řezné hrany.



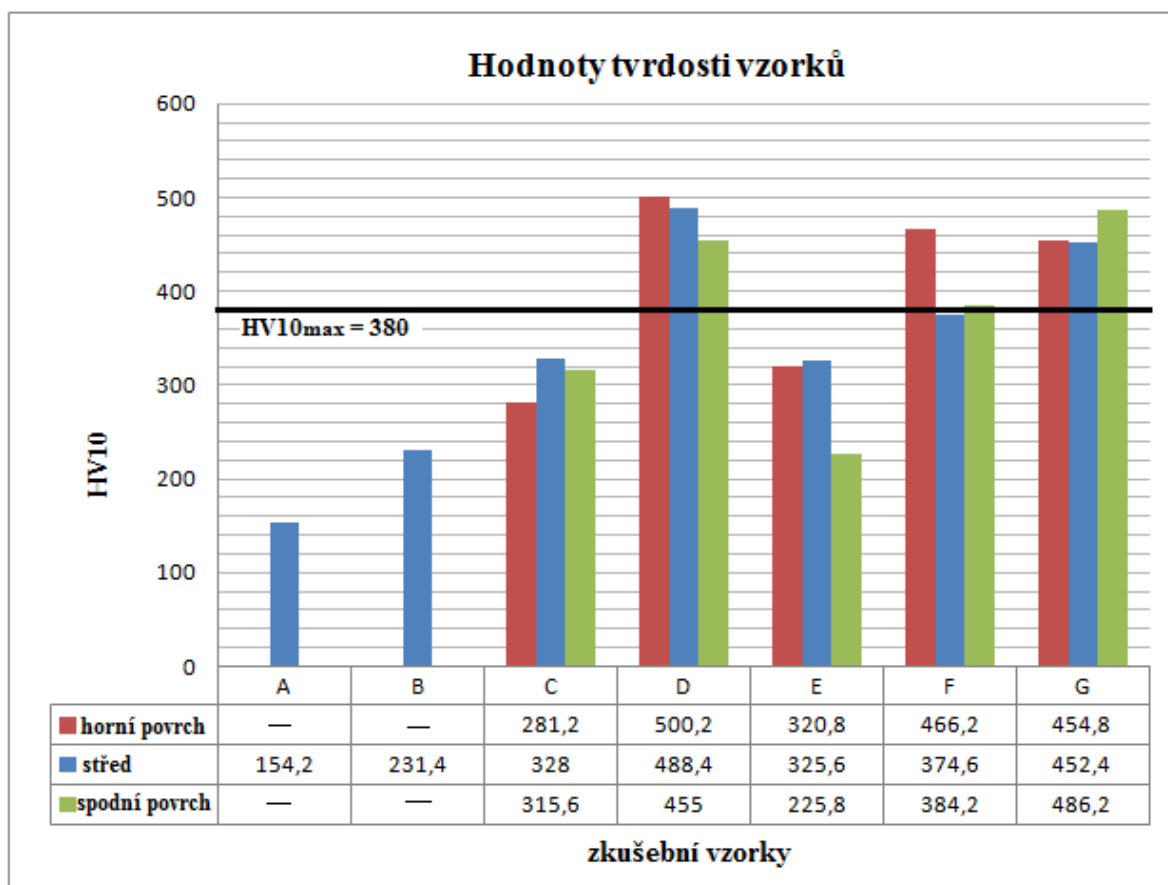
**Obr. č. 17** – Schéma měření tvrdosti na zkušebním vzorku

**Tabulka 10 – Výsledky měření**

označení vzorku	tloušťka (mm)	ocel dle ČSN EN 10027-1	oblast měření	1	2	3	4	5	průměr
<b>A</b>	5	S235JR+N	střed	155	155	152	155	154	154,2
<b>B</b>	5	S355J2+N	střed	231	233	237	227	229	231,4
<b>C</b>	10	S355J2W+N	horní povrch	274	268	282	285	297	281,2
			střed	320	331	318	332	339	328
			spodní povrch	302	317	323	311	325	315,6
<b>D</b>	10	S460N	horní povrch	509	497	498	498	499	<b>500,2</b>
			střed	495	497	484	480	486	<b>488,4</b>
			spodní povrch	469	472	470	430	434	<b>455</b>
<b>E</b>	20	S235JR+N	horní povrch	317	332	319	320	316	320,8
			střed	329	330	320	319	330	325,6
			spodní povrch	220	220	221	233	235	225,8
<b>F</b>	20	S355J2+N	horní povrch	469	464	457	466	475	<b>466,2</b>
			střed	379	373	370	382	369	374,6
			spodní povrch	389	377	382	381	392	<b>384,2</b>
<b>G</b>	18	S460N	horní povrch	455	461	455	453	450	<b>454,8</b>
			střed	457	458	450	447	450	<b>452,4</b>
			spodní povrch	492	487	484	477	491	<b>486,2</b>

V kapitole 2 v tabulce 5 je dle ČSN EN 1090-2+A1 uvedena maximální hodnota tvrdosti, která nesmí překročit hodnotu 380 HV<sub>10</sub>. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 10. Tabulka uvádí kromě jakosti a tloušťky zkoušeného materiálu, také a hlavně výsledné hodnoty měření tvrdosti. Dle tabulky 10 je možno konstatovat, že ne všechny použité vzorky vyhovují podmínce tvrdosti. Výsledné průměrné hodnoty, které podmínce tvrdosti nevyhovují, jsou v tabulce 10 označeny červenou barvou. Pro zobrazení výsledků byl zpracován graf na obrázku 18, kde můžeme odečíst konečné průměrné hodnoty a zda jsou hodnoty vyhovující nebo nevyhovující, neboli zda jsou menší než předepsané hodnoty. Pro přehlednost, zda konečné hodnoty nepřesahují hodnotu 380 HV<sub>10</sub>, je na grafu vyznačena kritická hranice dovolené hodnoty tvrdosti HV<sub>10max</sub>. Na grafu jsou také zapsány výsledné průměrné hodnoty jednotlivých oblastí měření, tj. horní povrch, střed a spodní povrch.

Hodnoty oblastí jsou odlišeny barvou. Na vzorku A i B byly měřeny hodnoty pouze na středu povrchu z důvodu malé tloušťky zkušební vzorku. Z grafu je možno vidět, které vzorky nesplňují podmínku tvrdosti a jsou to zkušební vzorky D, F a G. Pro úplné shrnutí výsledků, je zpracována tabulka 11, kde jsou zaznamenány konečné údaje.



**Obr. č. 18** – Grafické znázornění hodnot tvrdosti volných řezných hran vzorků

**Tabulka 11 – Shrnutí výsledků**

označení vzorku	tloušťka (mm)	ocel dle ČSN EN 10027-1	oblast měření	průměrná tvrdost	podmínka dle ČSN EN 1090-2+A1: HV10 < 380
<b>A</b>	5	S235JR+N	střed	154,2	<b>Vyhovuje</b>
<b>B</b>	5	S355J2+N	střed	231,4	<b>Vyhovuje</b>
<b>C</b>	10	S355J2W+N	horní povrch	281,2	<b>Vyhovuje</b>
			střed	328	
			spodní povrch	315,6	
<b>D</b>	10	S460N	horní povrch	<b>500,2</b>	<b>Nevyhovuje</b>
			střed	<b>488,4</b>	
			spodní povrch	<b>455</b>	
<b>E</b>	20	S235JR+N	horní povrch	320,8	<b>Vyhovuje</b>
			střed	325,6	
			spodní povrch	225,8	
<b>F</b>	20	S355J2+N	horní povrch	<b>466,2</b>	<b>Nevyhovuje</b>
			střed	374,6	
			spodní povrch	<b>384,2</b>	
<b>G</b>	18	S460N	horní povrch	<b>454,8</b>	<b>Nevyhovuje</b>
			střed	<b>452,4</b>	
			spodní povrch	<b>486,2</b>	

### 3.4. Měření kolmosti řezné hrany

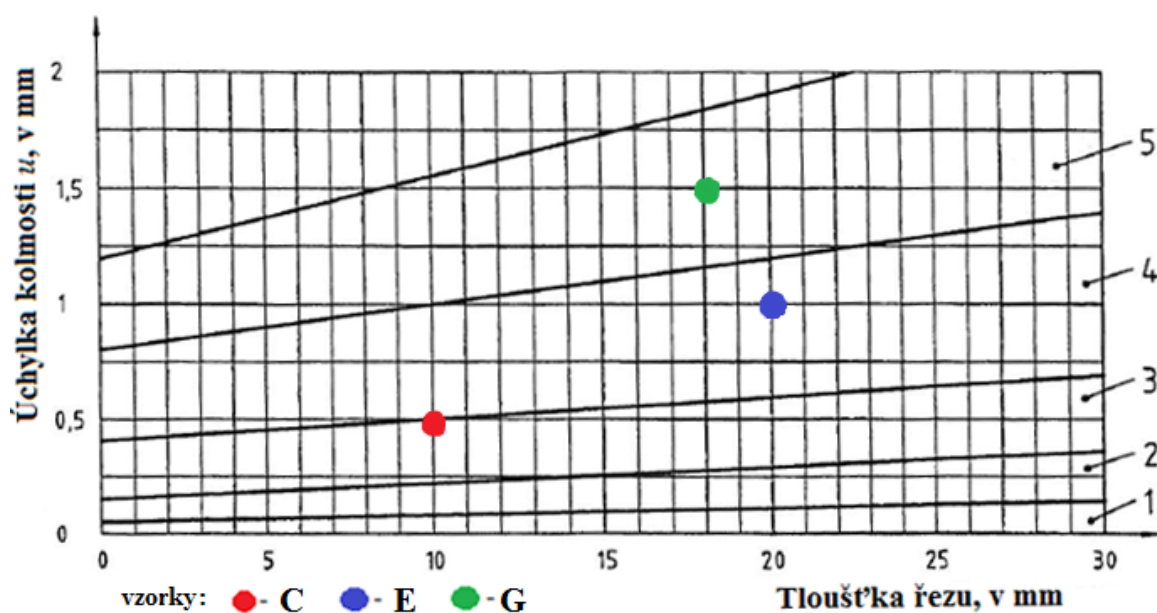
Měření geometrie volné řezné hrany bylo dalším úkolem této práce. Konkrétně se práce zabývá měřením úchytky kolmosti, která má vliv na jakost povrchu, a která je popsána v kapitole 1.5. Výsledky měření kolmosti jsou zaznamenány v tabulce 10. Kolmost byla měřena jako vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami, mezi nimiž je profil povrchu řezu. Dle tabulky 12 je možno konstatovat, že ne všechny řezné hrany jsou po tepelném dělení kolmé. U vzorků C, E a G vznikají úchytky kolmosti v rozmezí 0,5 – 1,5 mm.

Toleranční pole pro úchytku kolmosti,  $u$  dle ČSN EN ISO 9013 jsou uvedena v podkapitole 1.5.6. V rámci této normy je vypracován obr. č. 19 se zaznačenými úchytkami kolmosti  $u$  příslušných vzorků. Osa  $x$  označuje tloušťku řezu v mm. Osa  $y$  značí úchytku kolmosti v mm. Z grafu je možno vyčíst toleranční pole vzorků. Číslice 1 – 5 označují toleranční pole. U zkušební vzorku C je hodnota úchytky kolmosti  $u$  na hranici tolerančního pole 3 a 4. Dle tabulky 3 (uvedené v podkapitole 1.5.6.) se však blíží hodnota  $u$  vzorku C spíše k hodnotě úchytky kolmosti tolerančního pole 3.

Na závěr je zpracována tabulka 13, kde je možno vidět zařazení vzorků do příslušných tolerančních polí dle ČSN EN ISO 9013. Tabulka obsahuje pouze vzorky C, E, G, u kterých byla naměřena úchylka kolmosti.

**Tabulka 12** – měření úchylky kolmosti

Zkušební vzorek	Ocel dle ČSN EN 10027-1	Tloušťka (mm)	Úchylka kolmosti, $u$ (mm)
A	S235JR+N	5	0
B	S355J2+N	5	0
C	S355J2W+N	10	0,5
D	S460N	10	0
E	S235JR+N	20	1
F	S355J2+N	20	0
G	S460N	18	1,5



**Obr. č. 19** – Grafické zařazení vzorků do tolerančních polí [15]



**Tabulka 13** – Toleranční pole pro úchyly  
kolmosti použitých vzorků dle ČSN EN ISO 9013

Zkušební vzorek	Ocel dle ČSN EN 10027-1	Tloušťka (mm)	úchylka kolmosti (mm)	Toleranční pole
<b>C</b>	S355J2W+N	10	0,5	<b>3</b>
<b>E</b>	S235JR+N	20	1	<b>4</b>
<b>G</b>	S460N	18	1,5	<b>5</b>

#### 4. Závěr

V rámci norem ČSN EN 1090-1+A1 a ČSN EN 1090-2+A1, zabývající se stanovením požadavků na výrobu ocelových konstrukcí nebo jejich dílců pro všechny výrobce dodávající ocelové konstrukce na trh Evropské unie, byla zpracována problematika v rámci měření tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití plazmové technologie. Hlavním úkolem bylo vyhodnotit informace ohledně tvrdosti povrchu volné řezné hrany při použití 7 vzorků o různé jakosti a tloušťky. Dalším úkolem bylo zhodnotit geometrii povrchu volné řezné hrany, a to konkrétně kolmost povrchu.

Zkušební vzorky byly řezány plazmovou technologií na stroji VANAD APROXIMA 35/285 dusíkovou plazmou. Bylo použito 7 vzorků z oceli o různé jakosti a tloušťky. Tloušťky vzorků se pohybovali v rozmezí 5 – 20 mm.

Tvrdot povrchu volné řezné hrany se měřila dle Vickerse, a to při zatížení HV10. Tvrdot byla měřena v pěti bodech ve třech oblastech: na horním povrchu vzorku, na středu a na spodním povrchu vzorku. U zkušebních vzorků malé tloušťky byla tvrdot měřena jen na středu povrchu řezné hrany. Naměřené hodnoty byly zprůměrovány a vneseny do tabulky. Následně byly hodnoty graficky zpracovány, kde tvrdosti vzorků převyšují nebo nepřevyšují hodnotu 380 HV10. Na závěr je možno konstatovat, které oceli překračují maximální povolenou hodnotu tvrdosti při zatížení HV10 dle ČSN EN 1090-2+A1 a jsou nevhodné pro další konstrukční účely. Je to ocel:

- S355J2+N o tloušťce 20 mm,
- S460N o tloušťce 10 mm,
- S460N o tloušťce 18 mm.

Oceli, které splňují požadavky dle ČSN EN 1090-2+A1 a jsou vhodné pro další konstrukční účely, jsou následující:

- S235JR+N o tloušťce 5 mm,
- S355J2+N o tloušťce 5 mm,
- S355J2W+N o tloušťce 10 mm,
- S235JR+N o tloušťce 20 mm.

Lze poznamenat, že tvrdost řezné hrany od jakosti S355 překračuje maximální dovolenou hodnotu stanovenou dle normy. Pouze u jakosti S355J2+N a S355J2W+N, kde byly použité menší tloušťky, tvrdost nepřekročila předepsanou hodnotu.

Následujícím úkolem bylo měření kolmosti povrchu volných řezných hran. Při řezání vzorků vzniká geometricky nepřesný povrch, to má za následek vznik úchylek kolmosti. Úchylka kolmosti byla naměřena pouze u ocelí S355J2W+N, S235JR+N a S460N. U oceli S355J2W+N úchylka kolmosti nabyla hodnoty 0,5 mm, u oceli S235JR+N byla naměřena hodnota 1 mm. Největší úchylka kolmosti povrchu se projevila u oceli S460N, kdy byla naměřena hodnota 1,5 mm. Hodnoty úchylek kolmosti vzorků byly zaneseny do grafu dle ČSN EN ISO 9013 a bylo určeno jejich toleranční pole.

Práce má praktické využití pro výrobce konstrukčních dílů, které jsou tepelně děleny plazmovou technologií a pro účely těchto dodávek těchto dílů dle normy ČSN EN 1090-1+A1 a ČSN EN 1090-2+A1.

## **Poděkování**

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Sondelovi Ph.D. za cenné rady a zkušenosti při vypracovávání mé bakalářské práce a studia vysoké školy. Dále děkuji všem profesorům, kteří se se mnou podělili o své názory a zkušenosti.

## Seznam použité literatury

- [1] – KUČERA, Jan. 1987. *TEORIE SVAŘOVÁNÍ*. Ostrava: Vysoká škola báňská v Ostravě
- [2] – Řezání plazmou: CNC řezání plazmou. *Zámečnictví Boubelik: ZÁMEČNICKÉ PRÁCE - VÝROBA OCELOVÝCH KONSTRUKCÍ* [online]. webko [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: [http://www.zamecnictvi-boubelik.cz/rezani\\_plazmou.php](http://www.zamecnictvi-boubelik.cz/rezani_plazmou.php)
- [3] – KUČERA, Jan. *Teorie svařování: pokračování*. Ostrava: VŠB - Ostrava, 1991.
- [4] – KUCIPÁL, Josef et al. *Teorie svařování*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986.
- [5] – KOUKAL, Jaroslav et al. *SVAŘOVÁNÍ I*. Ostrava: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2005. ISBN 80 -248 - 0870 - 6.
- [6] – SCHWARZ, Drahomír a Ivo HLAVATÝ. Svařování plazmovým obloukem. [online]. ČSÚ, Ostrava, 2014, 4 s [cit. 2014-12-12]. Dostupné z: [http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2014/05/2014-1\\_SvarovaniPlazmou.pdf](http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2014/05/2014-1_SvarovaniPlazmou.pdf)
- [7] – BRICHNÁČ, Pavel. Plazmové technologie. *ALDEBARAN: BULLETIN* [online]. AGA, 2004 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004\\_20\\_plt.html](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_20_plt.html)
- [8] – Řezání kovů plazmou versus řezání autogenem. VÍTEK, Aleš. *Technika a trh: ...průvodce světem průmyslu* [online]. 2010. vyd. Brno: CCB, spol. s r. o. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://www.technikaatrh.cz/aktuality/rezani-kovu-plazmou-versus-rezani-autogenem>
- [9] – Laserové a plazmové řezání. [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>

- [10] – MRÁZ, L., M. PAČO a H. VRBENSKÁ. *HODNOTENIE KVALITY VOLNEJ TEPELNE REZANEJ HRANY KONŠTRUKČNÝCH OCELÍ PODĽA EN 1090-2*. [cit. 2015-04-13].
- [11] – Řezání kovů plazmou versus řezání autogenem. VÍTEK, Aleš. *Technika a trh: ...průvodce světem průmyslu*[online]. 2010. vyd. Brno: CCB, spol. s r. o. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z:<http://www.technikaatrh.cz/aktuality/rezani-kovu-plazmou-versus-rezani-autogenem>
- [12] – JANATA, Marek. Technické plyny pro řezání plazmou: Co je to plazma?. In: *Www.hadyna.cz* [online]. Praha [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/TP\\_plasma\\_2007.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/TP_plasma_2007.pdf)
- [13] – JANATA, Marek. Technické plyny pro řezání plazmou: Co je to plazma?. In: *Www.hadyna.cz* [online]. Praha [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/TP\\_plasma\\_2007.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/TP_plasma_2007.pdf)
- [14] – Laserové a plazmové řezání. [online]. [cit. 2015-04-06]. Dostupné z:<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>
- [15] – ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*. 2003. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [16] – ČSN EN 1090-2+A1. *Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce*. 2012. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [17] – ŠTEFANOVIČ, Milan. 2015. *Vítkovice Steel, a. s.: Cut shapes and treatment DUO technical PASSPORT*.
- [18] - TNI CEN ISO/TR 15608. *Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin*. 2008. Český normalizační institut.

## Seznam použitých obrázků a tabulek

**Obr. č. 1** – Plazmové řezání [2]

**Obr. č. 2** – princip řezného procesu [9]

**Obr. č. 3** – typy plazmových hořáků: a) s transferovým obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) s vodní stabilizací [14]

**Obr. č. 4** – Pojmy vztahující se k procesu řezání dle ČSN EN ISO 9013 [15]

**Obr. č. 5** – Pojmy vztahující se k zpracovávanému kusu po ukončení řezání dle ČSN EN ISO 9013 [15]

**Obr. č. 6** – Typy řezů; 1 – svislý přímý řez, 2 – šikmý přímý řez, 3 – dvojitý šikmý přímý řez [15]

**Obr. č. 7** – Tvarové řezy; 1 – svislý tvarový řez, 2 – šikmý tvarový řez [15]

**Obr. č. 8** – Skluzová rýha [15]

**Obr. č. 9** – Tolerance natavení řezné hrany [15]

**Obr. č. 10** – Drážkování; a – směr řezání, b – směr posuvu [15]

**Obr. č. 11** – Úchylky kolmosti nebo úchylky úhlů [15]

**Obr. č. 12** – Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu,  $u$  – tloušťka zpracovávaného kusu do 30 mm [15]

**Obr. č. 13** – Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu,  $u$  – tloušťka zpracovávaného kusu do 150 mm [15]

**Obr. č. 14** – Průměrná výška prvků profilu,  $Rz5$  – tloušťka zpracovávaného kusu do 30 mm [15]

**Obr. č. 15** – Průměrná výška prvků profilu,  $Rz5$  – tloušťka zpracovávaného kusu do 150 mm [15]

**Obr. č. 16** – Řezací stroj VANAD PROXIMA 35/285 [17]

**Obr. č. 17** – Schéma měření tvrdosti na zkušebním vzorku

**Obr. č. 18** – Grafické znázornění hodnot tvrdosti volných řezných hran vzorků

**Obr. č. 19** – Grafické zařazení vzorků do tolerančních polí [15]

**Tabulka 1** – Používané plyny v závislosti na materiálech [12]

**Tabulka 2** – Teploty předehřevu dle obsahu uhlíku [5]

**Tabulka 3** – Toleranční pole pro úchylku kolmosti dle ČSN EN ISO 9013 [15]

- Tabulka 4** – Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu [15]
- Tabulka 5** – Maximální dovolené hodnoty tvrdosti dle ČSN EN 1090-2+A1 [16]
- Tabulka 6** – parametry řezacího stroje [17]
- Tabulka 7** – zařazení materiálů do skupin a jejich tloušťky
- Tabulka 8** – Chemické složení vzorků
- Tabulka 9** – Zařazení vybraných skupin oceli dle TNI CEN ISO/TR 15608 [18]
- Tabulka 10** – Výsledky měření
- Tabulka 11** – Shrnutí výsledků
- Tabulka 12** – měření úchylny kolmosti
- Tabulka 13** – Toleranční pole pro úchylny kolmosti použitých vzorků dle ČSN EN ISO 9013